

BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES



Rapport
sur la 14^e comparaison des étalons nationaux
de résistance électrique
(novembre 1983 et février 1984)
par G. Leclerc

PAVILLON DE BRETEUIL
F-92310 SEVRES
France

Rapport
sur la 14^e comparaison des étalons nationaux
de résistance électrique
(novembre 1983 et février 1984)

par G. Leclerc

C'est au cours de sa 16^e session, en mars 1983, que le Comité Consultatif d'Electricité a prévu l'organisation de cette comparaison. Les treize laboratoires, membres du CCE, ayant décidé d'y participer, il n'a pas paru raisonnable de réunir simultanément au BIPM les étalons représentatifs de ces treize laboratoires pour n'effectuer qu'une seule comparaison qui aurait été de très longue durée. Nous avons donc proposé aux laboratoires de les répartir en deux groupes et d'effectuer successivement deux comparaisons d'une durée d'environ six semaines chacune, les six étalons de référence du BIPM participant aux deux comparaisons.

Après consultation des laboratoires, les deux groupes ont été constitués comme suit :

Groupe A : NPRL (Prétoria), ASMW (Berlin), PTB (Braunschweig), NRC (Ottawa), LCIE (Fontenay-aux Roses), IEN (Turin) et IMM (Leningrad).

Ces sept laboratoires ont fait parvenir au BIPM 19 étalons de 1 Ω qui ont été comparés entre eux et aux étalons du BIPM suivant un schéma qui a nécessité l'exécution de 62 séries "aller" et de 62 séries "retour", effectuées symétriquement dans le temps par rapport au 26 novembre 1983. La comparaison, commencée le 3 novembre 1983, a été terminée le 20 décembre.

Groupe B : CSIRO (Lindfield), NIM (Beijing), NBS (Gaithersburg), ETL (Ibaraki), VSL (Delft) et NPL (Teddington).

Ces six laboratoires ont fait parvenir au BIPM 17 étalons de 1 Ω qui ont été comparés entre eux et aux étalons du BIPM suivant un schéma qui a nécessité l'exécution de 66 séries "aller" et de 66 séries "retour", effectuées symétriquement dans le temps par rapport au 12 février 1984. La comparaison, commencée le 20 janvier 1984, a été terminée le 5 mars.

Tous les étalons voyageurs étaient des étalons de premier ordre, à quatre bornes et étanches. Pendant la durée de leur séjour au BIPM ils ont été conservés à 20 °C dans des bains d'huile thermorégulés.

Les comparaisons ont été effectuées au moyen d'un pont double de Thomson à bras de 1 000 Ω , en utilisant la méthode de substitution (les deux étalons comparés au cours d'une série de mesures étant opposés à tour de rôle à une résistance tare ajustable). Au milieu de chaque

série, les bras "mesure" et "tare" du pont étaient inversés. Pendant les observations, les étalons étaient parcourus par un courant de 0,1 A et leur température était déterminée à l'aide d'un thermomètre à résistance de platine.

La résistance à 0 °C des deux thermomètres utilisés et celle de l'étalon tare ont été déterminées avant le début de la comparaison des étalons du groupe A, dans l'intervalle entre cette comparaison et celle des étalons du groupe B et dès la fin de celle-ci. Les ponts thermométriques ont été étalonnés en octobre et fin décembre 1983. Les mesures "aller" et les mesures "retour" de chaque comparaison ont été faites en employant des boîtes shunts différentes pour réaliser l'équilibre principal du pont.

Deux observateurs ont effectué chacun deux séries de mesures par jour, les séries "retour" de l'un correspondant aux séries "aller" de l'autre.

Les six étalons du BIPM dont la résistance moyenne sert à matérialiser Ω_{69-BI} (représentation, conservée par le BIPM, de l'unité SI de résistance) ont été comparés deux à deux entre eux avant la première comparaison (du 17 au 21 octobre 1983), dans l'intervalle entre les deux comparaisons (du 30 décembre 1983 au 6 janvier 1984) et après la seconde comparaison (du 15 au 21 mars 1984).

Réduction des observations

Les résultats des comparaisons ont été traités par la méthode des moindres carrés. De la somme des valeurs des six étalons de référence du BIPM on a déduit la valeur de chacun des étalons voyageurs en fonction de Ω_{69-BI} , à 20 °C, pour une dissipation de 0,01 W dans l'étalon pendant la durée des observations et à la pression de 101 325 Pa pour les étalons dont on connaissait le coefficient de pression. Les résultats sont donnés dans le Tableau A1 pour les étalons du groupe A (date centrale des mesures : 26 novembre 1983) et dans le tableau B1 pour ceux du groupe B (date centrale des mesures : 12 février 1984).

Les calculs qui ont permis ensuite de rattacher la représentation de l'ohm conservée par chaque laboratoire à celle conservée par le BIPM (Ω_{69-BI}) sont reproduits dans les tableaux A2 et A3 pour les laboratoires du groupe A et B2 et B3 pour ceux du groupe B.

Les étalons voyageurs du CSIRO ayant souffert de leur transport en fret entre Linfield et Paris via Londres, le CSIRO a décidé de ne pas retenir les résultats auxquels ils ont conduit. Pour cette raison les calculs les concernant ne figurent pas dans les tableaux B2 et B3.

Une nouvelle comparaison de Ω_{CSIRO} à Ω_{69-BI} a été effectuée en mars-avril 1985 mais son résultat n'est pas encore connu. Elle fera l'objet d'un complément à ce rapport.

Comparaison supplémentaire de Ω_{NPL} à $\Omega_{69\text{-BI}}$

Cette comparaison a été entreprise à l'occasion du transit par le BIPM, en provenance d'Australie, de deux étalons de 1 Ω du CSIRO destinés au NPL.

Les deux étalons ont été comparés entre eux et aux six étalons de référence du BIPM, en janvier 1984, immédiatement avant le début de la comparaison internationale du Groupe B et en mars 1984, immédiatement après l'achèvement de cette comparaison. En fonction de $\Omega_{69\text{-BI}}$ on a obtenu les valeurs suivantes des étalons, à 20 °C, à la mi-février 1985 (époque moyenne des deux déterminations) :

étalon S-60652 : 1,000 054 15 $\Omega_{69\text{-BI}}$
S-60656 : 1,000 011 80 $\Omega_{69\text{-BI}}$

Transportés et étalonnés au NPL en même temps que les étalons voyageurs de ce laboratoire, leurs valeurs à 20 °C, exprimées en fonction de Ω_{NPL} , au 29 mars 1985 (date centrale des mesures), ont été les suivantes :

étalon S-60652 : 1,000 053 77 Ω_{NPL}
S-60656 : 1,000 011 43 Ω_{NPL}

On en déduit qu'en février-mars 1985 on avait la relation ci-après entre Ω_{NPL} et $\Omega_{69\text{-BI}}$:

avec S-60652 $\Omega_{\text{NPL}} = \Omega_{69\text{-BI}} + 0,38 \mu\Omega$
S-60656 $\Omega_{\text{NPL}} = \Omega_{69\text{-BI}} + 0,37 \mu\Omega$

et en moyenne $\Omega_{\text{NPL}} = \Omega_{69\text{-BI}} + 0,37 \mu\Omega$.

Bien que cette comparaison ne soit pas métrologiquement complète, les étalons S-60652 et S-60656 n'ayant pas été réétalonnés au BIPM après leur mesure au NPL, ce dernier a désiré qu'il en soit tenu compte pour calculer le résultat final de la 14^e comparaison internationale en ce qui le concernait. Ainsi qu'il l'a proposé, ce résultat final a donc été calculé en prenant la moyenne pondérée des résultats individuels des trois étalons voyageurs et des étalons S-60652 et S-60656, les trois premiers affectés d'un poids double de celui affecté aux deux autres, ce qui a conduit à la relation suivante : $\Omega_{\text{NPL}} = \Omega_{69\text{-BI}} + 0,32 \mu\Omega$.

Liste des étalons de résistance
qui ont participé à la 14^e comparaison

<u>Laboratoire</u>	<u>Etalon</u>	<u>Arrivée au BIPM</u>	<u>Départ du BIPM</u>	<u>Mode de transport</u>
<u>Premier groupe :</u>				
NPRL (Afrique du Sud)	1132427	29 septembre 1983	29 février 1984	par avion accompagnés
	1146606			
ASMW (Rép. Dém. Allemande)	501	16 octobre 1983	9 mars 1984	par avion accompagnés
	508			
	D-3			
PTB (Rép. Féd. d'Allemagne)	1692273	14 octobre 1983	18 janvier 1984	par la route accompagnés
	1730950			
	1730951			
NRC (Canada)	1336435	2 novembre 1983	11 janvier 1984	par avion en fret
	1336436			
	32249			
LCIE (France)	1732525	28 octobre 1983	17 janvier 1984	par la route accompagnés
	1732530			
	1732532			
IEN (Italie)	1681955	26 octobre 1983	17 janvier 1984	par la route accompagnés
	1681957			
	1723160			
IMM (URSS)	710	15 octobre 1983	6 avril 1984	par avion accompagnés
	922			
<u>Deuxième groupe</u>				
CSIRO (Australie)	S-60655	14 décembre 1983	14 mars 1984	par avion en fret
	S-60657			
NIM (Rép. Pop. de Chine)	127BZ13	11 janvier 1984	12 mars 1984	par avion accompagnés
	201BZ13			
	303BZ13			
NBS (Etats-Unis d'Amérique)	77	1 décembre 1983	2 mars 1984	par avion accompagnés
	1018			
	1020			
ETL (Japon)	8C13	10 janvier 1984	15 mars 1984	par avion en fret
	70C111			
	72C202			
VSL (Pays-Bas)	1753639	5 décembre 1983	18 avril 1984	par la route accompagnés
	1753641			
	1756653			
NPL (Royaume-Uni)	713	9 janvier 1984	16 mars 1984	par avion accompagnés
	221921			
	221928			

Tableau A1

Résistance des étalons voyageurs, à 20 °C,
 exprimée en fonction de Ω_{69-BI}
 (représentation, conservée par le BIPM, de l'unité SI de résistance)
 au 26 novembre 1983 (date centrale de la comparaison)

Laboratoire	Etalon	Résistance	Incertitude (s)
<u>NPRL</u>	1 132 427	0,999 992 57 Ω_{69-BI}	0,011 $\mu\Omega$
	1 146 606	0,999 991 90 Ω_{69-BI}	0,011
<u>ASMW</u>	501	1,000 015 02 Ω_{69-BI}	0,013 $\mu\Omega$
	508	0,999 992 39 Ω_{69-BI}	0,013
	D-3	1,000 041 68	0,012
<u>PTB</u>	1 692 273	0,999 980 81 Ω_{69-BI}	0,012 $\mu\Omega$
	1 730 950	0,999 976 83 Ω_{69-BI}	0,012
	1 730 951	0,999 975 24	0,012
<u>NRC</u>	32 249	1,000 029 72 Ω_{69-BI}	0,012 $\mu\Omega$
	1 336 435	0,999 995 00 Ω_{69-BI}	0,012
	1 336 436	0,999 992 97	0,013
<u>LCIE</u>	1 732 525	0,999 978 22 Ω_{69-BI}	0,013 $\mu\Omega$
	1 732 530	0,999 978 06 Ω_{69-BI}	0,012
	1 732 532	0,999 978 41	0,012
<u>IEN</u>	1 681 955	0,999 976 85 Ω_{69-BI}	0,012 $\mu\Omega$
	1 681 957	0,999 974 77 Ω_{69-BI}	0,012
	1 723 160	0,999 979 34	0,012
<u>IMM</u>	710	0,999 996 79 Ω_{69-BI}	0,011 $\mu\Omega$
	922	1,000 014 40 Ω_{69-BI}	0,011

Tableau A2

Résistance* des étalons voyageurs, à 20 °C, exprimée en fonction de la représentation de l'ohm conservée par leur laboratoire d'origine, à la date du 26 novembre 1983

La résistance au 26 novembre 1983, date centrale de la comparaison, a été calculée par interpolation linéaire entre les résistances attribuées aux étalons par les laboratoires nationaux avant et après les mesures au BIPM.

Etalon	<u>NPRL</u>		
	1 ^{er} septembre 1983	23 mars 1984	26 novembre 1983
1132427	0,999 992 6	0,999 992 65	0,999 992 62 Ω_{NPRL}
1146606	0,999 991 8	0,999 991 75	0,999 991 78 Ω_{NPRL}
	<hr/>	<hr/>	<hr/>
	0,999 992 20	0,999 992 20	0,999 992 20 Ω_{NPRL}

Valeurs mesurées sous une pression de 88 180 Pa.

	<u>ASMW</u>		
	11 octobre 1983	19 mars 1984	
501	1,000 014 9	1,000 014 9	1,000 014 90 Ω_{ASMW}
508	0,999 992 3	0,999 992 2	0,999 992 27 Ω_{ASMW}
D-3	1,000 041 8	1,000 041 6	1,000 041 74
	<hr/>	<hr/>	<hr/>
	1,000 016 33	1,000 016 23	1,000 016 30 Ω_{ASMW}

	<u>PTB</u>		
	1 ^{er} octobre 1983	1 ^{er} février 1984	
1692273	0,999 979 729	0,999 979 768	0,999 979 747 Ω_{PTB}
1730950	0,999 975 751	0,999 975 798	0,999 975 772 Ω_{PTB}
1730951	0,999 974 117	0,999 974 222	0,999 974 165
	<hr/>	<hr/>	<hr/>
	0,999 976 532	0,999 976 596	0,999 976 561 Ω_{PTB}

Mesures effectuées avec un courant de 0,042 A.

	<u>NRC</u>		
	22 octobre 1983	24 janvier 1984	
32249	1,000 031 27	1,000 031 64	1,000 031 41 Ω_{NRC}
1336435	0,999 996 89	0,999 996 83	0,999 996 87 Ω_{NRC}
1336436	0,999 994 84	0,999 994 79	0,999 994 82 Ω_{NRC}
	<hr/>	<hr/>	<hr/>
	1,000 007 67	1,000 007 75	1,000 007 70 Ω_{NRC}

Mesures effectuées avec un courant de 0,05 A.

* Sauf indication contraire cette résistance a été mesurée sous une pression voisine de 101 325 Pa et avec un courant de 0,1 A.

Tableau A2 (suite)

<u>LCIE</u>			
Etalon	21 octobre 1983	3 février 1984	26 novembre 1983
1732525	0,999 977 30	0,999 977 30	0,999 977 30 $\frac{\Omega}{LCIE}$
1732530	0,999 977 12	0,999 977 13	0,999 977 12
1732532	0,999 977 47	0,999 977 47	0,999 977 47
	<u>0,999 977 30</u>	<u>0,999 977 30</u>	<u>0,999 977 30 $\frac{\Omega}{LCIE}$</u>
<u>IEN</u>			
	10 octobre 1983	1 ^{er} février 1984	
1681955	0,999 975 42	0,999 975 36	0,999 975 40 $\frac{\Omega}{IEN}$
1681957	0,999 973 40	0,999 973 33	0,999 973 37
1723160	0,999 977 84	0,999 977 85	0,999 977 84
	<u>0,999 975 55</u>	<u>0,999 975 51</u>	<u>0,999 975 53 $\frac{\Omega}{IEN}$</u>
<u>IMM</u>			
	6 octobre 1983	19 avril 1984	
710	0,999 995 38	0,999 995 20	0,999 995 33 $\frac{\Omega}{IMM}$
922	1,000 012 99	1,000 012 85	1,000 012 95
	<u>1,000 004 18₅</u>	<u>1,000 004 02₅</u>	<u>1,000 004 14 $\frac{\Omega}{IMM}$</u>

Tableau A3

Valeur de la représentation de l'ohm conservée par chaque laboratoire en fonction de $\underline{\Omega}_{69-BI}$, représentation conservée par le BIPM, à la date du 26 novembre 1983

Etalon	<u>NRPL</u>				
1132427	0,999 992 77	$\underline{\Omega}_{NPRL}$	=	0,999 992 57	$\underline{\Omega}_{69-BI}$
1146606	0,999 991 93	$\underline{\Omega}_{NPRL}$	=	0,999 991 90	$\underline{\Omega}_{69-BI}$
					d'où $\underline{\Omega}_{NPRL} = \underline{\Omega}_{69-BI} - 0,20 \mu\Omega$
					= $\underline{\Omega}_{69-BI} - 0,03$
	0,999 992 35	$\underline{\Omega}_{NPRL}$	=	0,999 992 23	$\underline{\Omega}_{69-BI}$
					d'où $\underline{\Omega}_{NPRL} = \underline{\Omega}_{69-BI} - 0,12 \mu\Omega$

Les valeurs du NPRL données dans le tableau A2 ont été corrigées pour les ramener à la pression de 101 325 Pa.

	<u>ASMW</u>				
501	1,000 014 90	$\underline{\Omega}_{ASMW}$	=	1,000 015 02	$\underline{\Omega}_{69-BI}$
508	0,999 992 27	$\underline{\Omega}_{ASMW}$	=	0,999 992 39	$\underline{\Omega}_{69-BI}$
D-3	1,000 041 74	$\underline{\Omega}_{ASMW}$	=	1,000 041 68	$\underline{\Omega}_{69-BI}$
					d'où $\underline{\Omega}_{ASMW} = \underline{\Omega}_{69-BI} + 0,12 \mu\Omega$
					= $\underline{\Omega}_{69-BI} + 0,12$
					= $- 0,06$
	1,000 016 30	$\underline{\Omega}_{ASMW}$	=	1,000 016 36	$\underline{\Omega}_{69-BI}$
					d'où $\underline{\Omega}_{ASMW} = \underline{\Omega}_{69-BI} + 0,06 \mu\Omega$

	<u>PTB</u>				
1692273	0,999 979 747	$\underline{\Omega}_{PTB}$	=	0,999 980 811	$\underline{\Omega}_{69-BI}$
1730950	0,999 975 772	$\underline{\Omega}_{PTB}$	=	0,999 976 831	$\underline{\Omega}_{69-BI}$
1730951	0,999 974 165	$\underline{\Omega}_{PTB}$	=	0,999 975 236	$\underline{\Omega}_{69-BI}$
					d'où $\underline{\Omega}_{PTB} = \underline{\Omega}_{69-BI} + 1,06_4 \mu\Omega$
					= $\underline{\Omega}_{69-BI} + 1,05_9$
					= $+ 1,07_1$
	0,999 976 561	$\underline{\Omega}_{PTB}$	=	0,999 977 626	$\underline{\Omega}_{69-BI}$
					d'où $\underline{\Omega}_{PTB} = \underline{\Omega}_{69-BI} + 1,06_5 \mu\Omega$

	<u>NRC</u>				
1336435	0,999 996 87	$\underline{\Omega}_{NRC}$	=	0,999 995 00	$\underline{\Omega}_{69-BI}$
1336436	0,999 994 82	$\underline{\Omega}_{NRC}$	=	0,999 992 97	$\underline{\Omega}_{69-BI}$
					d'où $\underline{\Omega}_{NRC} = \underline{\Omega}_{69-BI} - 1,87 \mu\Omega$
					= $\underline{\Omega}_{69-BI} - 1,85$
	0,999 995 84 ₅	$\underline{\Omega}_{NRC}$	=	0,999 993 98 ₅	$\underline{\Omega}_{69-BI}$
					d'où $\underline{\Omega}_{NRC} = \underline{\Omega}_{69-BI} - 1,86 \mu\Omega$

Sa valeur ayant anormalement varié au cours des transports, l'étalon n° 32249 a été éliminé à la demande du NRC.

	<u>LCIE</u>				
1732525	0,999 977 30	$\underline{\Omega}_{LCIE}$	=	0,999 978 22	$\underline{\Omega}_{69-BI}$
1732530	0,999 977 12	$\underline{\Omega}_{LCIE}$	=	0,999 978 06	$\underline{\Omega}_{69-BI}$
1732532	0,999 977 47	$\underline{\Omega}_{LCIE}$	=	0,999 978 41	$\underline{\Omega}_{69-BI}$
					d'où $\underline{\Omega}_{LCIE} = \underline{\Omega}_{69-BI} + 0,92 \mu\Omega$
					= $\underline{\Omega}_{69-BI} + 0,94$
					= $+ 0,94$
	0,999 977 30	$\underline{\Omega}_{LCIE}$	=	0,999 978 23	$\underline{\Omega}_{69-BI}$
					d'où $\underline{\Omega}_{LCIE} = \underline{\Omega}_{69-BI} + 0,93 \mu\Omega$

Tableau A3 (suite)

Etalon	<u>IEN</u>			
1681955	0,999 975 40	$\underline{\Omega}_{IEN} = 0,999 976 85$	$\underline{\Omega}_{69-BI}$	d'où $\underline{\Omega}_{IEN} = \underline{\Omega}_{69-BI} + 1,45 \mu\Omega$
1681957	0,999 973 37	$= 0,999 974 77$		$= \underline{\Omega}_{69-BI} + 1,40$
1723160	0,999 977 84	$= 0,999 979 34$		$= \underline{\Omega}_{69-BI} + 1,50$
	0,999 975 53	$\underline{\Omega}_{IEN} = 0,999 976 98$	$\underline{\Omega}_{69-BI}$	d'où $\underline{\Omega}_{IEN} = \underline{\Omega}_{69-BI} + 1,45 \mu\Omega$
	<u>IMM</u>			
710	0,999 995 33	$\underline{\Omega}_{IMM} = 0,999 996 79$	$\underline{\Omega}_{69-BI}$	d'où $\underline{\Omega}_{IMM} = \underline{\Omega}_{69-BI} + 1,46 \mu\Omega$
922	1,000 012 95	$= 1,000 014 40$		$= \underline{\Omega}_{69-BI} + 1,45$
	1,000 004 14	$\underline{\Omega}_{IMM} = 1,000 005 59$	$\underline{\Omega}_{69-BI}$	d'où $\underline{\Omega}_{IMM} = \underline{\Omega}_{69-BI} + 1,45 \mu\Omega$

Tableau B1

Résistance des étalons voyageurs, à 20 °C,
 exprimée en fonction de $\frac{\Omega}{69-BI}$
 (représentation, conservée par le BIPM, de l'unité SI de résistance)
 au 12 février 1984 (date centrale de la comparaison)

Laboratoire	Etalon	Résistance	Incertitude (s)
<u>CSIRO</u> (NML)	S-60 655	0,999 997 97 $\frac{\Omega}{69-BI}$	0,008 $\mu\Omega$
	S-60 657	1,000 000 75	0,008
<u>NIM</u>	127 BZ 13	0,999 989 22 $\frac{\Omega}{69-BI}$	0,010 $\mu\Omega$
	201 BZ 13	0,999 987 38	0,010
	303 BZ 13	1,000 002 79	0,012
<u>NBS</u>	77	1,000 006 11 $\frac{\Omega}{69-BI}$	0,008 $\mu\Omega$
	1018	0,999 974 32	0,009
	1020	0,999 974 16	0,008
<u>ETL</u>	8C13	0,999 994 20 $\frac{\Omega}{69-BI}$	0,009 $\mu\Omega$
	70C111	1,000 002 33	0,009
	72C202	0,999 999 30	0,010
<u>VSL</u>	1 753 639	0,999 977 28 $\frac{\Omega}{69-BI}$	0,010 $\mu\Omega$
	1 753 641	0,999 977 31	0,010
	1 756 653	0,999 978 72	0,011
<u>NPL</u>	713	1,000 049 34 $\frac{\Omega}{69-BI}$	0,010 $\mu\Omega$
	221 921	1,000 007 66	0,009
	221 928	0,999 999 95	0,009

Tableau B2

Résistance* des étalons voyageurs, à 20 °C, exprimée en fonction de la représentation de l'ohm conservée par leur laboratoire d'origine, à la date du 12 février 1984

La résistance au 12 février 1984, date centrale de la comparaison, a été calculée par interpolation linéaire entre les résistances attribuées aux étalons par les laboratoires nationaux avant et après les mesures au BIPM.

Etalon	<u>NIM</u>		
	7 décembre 1983	22 mars 1984	12 février 1984
127BZ13	0,999 988 77	0,999 988 76	0,999 988 76 Ω_{NIM}
201BZ13	0,999 986 82	0,999 986 80	0,999 986 81
303BZ13	1,000 002 34	1,000 002 30	1,000 002 31
	<hr/>	<hr/>	<hr/>
	0,999 992 64	0,999 992 62	0,999 992 63 Ω_{NIM}

<u>NBS</u>	
77	1,000 005 90 ₅ Ω_{NBS}
1018	0,999 974 15 ₄
1020	0,999 973 96 ₇
	<hr/>
	0,999 984 67 ₅ Ω_{NBS}

La résistance de chaque étalon au 12 février 1984 a été calculée au NBS en utilisant une formule de régression linéaire déduite de 94 mesures : 61 mesures faites entre le 2 septembre et le 28 novembre 1983 (avant l'envoi des étalons au BIPM) et 33 mesures faites entre le 3 mars et le 2 mai 1984 (après leur retour à Gaithersburg).

	<u>ETL</u>		
	15 novembre 1983	10 mai 1984	
8C13	0,999 992 78	0,999 992 56	0,999 992 67 Ω_{ETL}
70C111	1,000 000 88	1,000 000 66	1,000 000 77
72C202	0,999 997 79	0,999 997 62	0,999 997 70
	<hr/>	<hr/>	<hr/>
	0,999 997 15	0,999 996 95	0,999 997 05 Ω_{ETL}

*Cette résistance a été mesurée sous une pression voisine de 101 325 Pa et avec un courant de 0,1 A.

Tableau B3

Valeur de la représentation de l'ohm conservée par chaque laboratoire en fonction de $\underline{\Omega}_{69-BI}$, représentation conservée par le BIPM, à la date du 12 février 1984

Etalon	<u>NIM</u>		
127BZ13	0,999 988 76 $\underline{\Omega}_{NIM}$	= 0,999 989 22 $\underline{\Omega}_{69-BI}$	d'où $\underline{\Omega}_{NIM} = \underline{\Omega}_{69-BI} + 0,46 \mu\Omega$
201BZ13	0,999 986 81	= 0,999 987 38	= + 0,57
303BZ13	1,000 002 31	= 1,000 002 79	= + 0,48
	<hr/>	<hr/>	<hr/>
	0,999 992 63 $\underline{\Omega}_{NIM}$	= 0,999 993 13 $\underline{\Omega}_{69-BI}$	d'où $\underline{\Omega}_{NIM} = \underline{\Omega}_{69-BI} + 0,50 \mu\Omega$
	<u>NBS</u>		
77	1,000 005 91 $\underline{\Omega}_{NBS}$	= 1,000 006 11 $\underline{\Omega}_{69-BI}$	d'où $\underline{\Omega}_{NBS} = \underline{\Omega}_{69-BI} + 0,20 \mu\Omega$
1018	0,999 974 15	= 0,999 974 32	= + 0,17
1020	0,999 973 97	= 0,999 974 16	= + 0,19
	<hr/>	<hr/>	<hr/>
	0,999 984 68 $\underline{\Omega}_{NBS}$	= 0,999 984 86 $\underline{\Omega}_{69-BI}$	d'où $\underline{\Omega}_{NBS} = \underline{\Omega}_{69-BI} + 0,19 \mu\Omega$
	<u>ETL</u>		
8C13	0,999 992 67 $\underline{\Omega}_{ETL}$	= 0,999 994 20 $\underline{\Omega}_{69-BI}$	d'où $\underline{\Omega}_{ETL} = \underline{\Omega}_{69-BI} + 1,53 \mu\Omega$
70C111	1,000 000 77	= 1,000 002 33	= + 1,56
72C202	0,999 997 70	= 0,999 999 30	= + 1,60
	<hr/>	<hr/>	<hr/>
	0,999 997 05 $\underline{\Omega}_{ETL}$	= 0,999 998 61 $\underline{\Omega}_{69-BI}$	d'où $\underline{\Omega}_{ETL} = \underline{\Omega}_{69-BI} + 1,56 \mu\Omega$
	<u>VSL</u>		
1753639	0,999 976 75 $\underline{\Omega}_{VSL}$	= 0,999 977 28 $\underline{\Omega}_{69-BI}$	d'où $\underline{\Omega}_{VSL} = \underline{\Omega}_{69-BI} + 0,53 \mu\Omega$
1753641	0,999 976 72	= 0,999 977 31	= + 0,59
1756653	0,999 978 16	= 0,999 978 72	= + 0,56
	<hr/>	<hr/>	<hr/>
	0,999 977 21 $\underline{\Omega}_{VSL}$	= 0,999 977 77 $\underline{\Omega}_{69-BI}$	d'où $\underline{\Omega}_{VSL} = \underline{\Omega}_{69-BI} + 0,56 \mu\Omega$

Tableau B3 (suite)

Etalon	<u>NPL</u>		
713	1,000 048 96 Ω_{NPL}	= 1,000 049 34 $\Omega_{69\text{-BI}}$	d'où $\Omega_{\text{NPL}} = \Omega_{69\text{-BI}} + 0,38 \mu\Omega$
221921	1,000 007 37 Ω_{NPL}	= 1,000 007 66 $\Omega_{69\text{-BI}}$	= $\Omega_{69\text{-BI}} + 0,29$
221928	0,999 999 72	= 0,999 999 95	= + 0,23
	<hr/>	<hr/>	<hr/>
	1,000 018 68 Ω_{NPL}	= 1,000 018 98 $\Omega_{69\text{-BI}}$	d'où $\Omega_{\text{NPL}} = \Omega_{69\text{-BI}} + 0,30 \mu\Omega$

Comparaison auxiliaire

S-60652	1,000 053 77 Ω_{NPL}	= 1,000 054 15 $\Omega_{69\text{-BI}}$	d'où $\Omega_{\text{NPL}} = \Omega_{69\text{-BI}} + 0,38 \mu\Omega$
S-60656	1,000 011 43 Ω_{NPL}	= 1,000 011 80 $\Omega_{69\text{-BI}}$	= $\Omega_{69\text{-BI}} + 0,37$
	<hr/>	<hr/>	<hr/>
	1,000 032 60 Ω_{NPL}	= 1,000 032 97 $\Omega_{69\text{-BI}}$	d'où $\Omega_{\text{NPL}} = \Omega_{69\text{-BI}} + 0,37 \mu\Omega$

Moyenne pondérée (voir p. 3) : $\Omega_{\text{NPL}} = \Omega_{69\text{-BI}} + 0,32 \mu\Omega$

Tableau IV

Résultats de la 14^e comparaison
des étalons nationaux de résistance

Au 26 novembre 1983

Afrique du Sud (NPRL)	: $\frac{\Omega}{\Omega_{NPRL}}$ = $\frac{\Omega}{\Omega_{69-BI}}$ - 0,12 $\mu\Omega$
République Dém. Allemande (ASMW)	: $\frac{\Omega}{\Omega_{ASMW}}$ = + 0,06
République Féd. d'Allemagne (PTB)	: $\frac{\Omega}{\Omega_{PTB}}$ = + 1,06
Canada (NRC)	: $\frac{\Omega}{\Omega_{NRC}}$ = - 1,86
France (LCIE)	: $\frac{\Omega}{\Omega_{LCIE}}$ = + 0,93
Italie (IEN)	: $\frac{\Omega}{\Omega_{IEN}}$ = + 1,45
URSS (IMM)	: $\frac{\Omega}{\Omega_{IMM}}$ = + 1,45

Au 12 février 1984

République Pop. de Chine (NIM)	: $\frac{\Omega}{\Omega_{NIM}}$ = $\frac{\Omega}{\Omega_{69-BI}}$ + 0,50 $\mu\Omega$
Etats-Unis d'Amérique (NBS)	: $\frac{\Omega}{\Omega_{NBS}}$ = + 0,19
Japon (ETL)	: $\frac{\Omega}{\Omega_{ETL}}$ = + 1,56
Pays-Bas (VSL)	: $\frac{\Omega}{\Omega_{VSL}}$ = + 0,56
Royaume-Uni (NPL)	: $\frac{\Omega}{\Omega_{NPL}}$ = + 0,32

avec $\frac{\Omega}{\Omega_{69-BI}}$ (au 12 février 1984) - $\frac{\Omega}{\Omega_{69-BI}}$ (au 26 novembre 1983) = - 0,012 $\mu\Omega$

($s = 0,001 \mu\Omega$)

Incertitudes

1 - Incertitude sur la valeur des étalons voyageurs exprimée en fonction de Ω_{69-BI} (résultats des mesures du BIPM)

- Incertitudes de type A (voir tableaux A1 et B1) :

écart-type maximal sur la résistance d'un étalon : $0,013 \mu\Omega$

- Incertitudes de type B

- due à la puissance dissipée dans l'étalon pendant les observations : $0,01 \mu\Omega$

- due à la méthode de mesure (non rigoureusement potentiométrique) et aux incertitudes sur la valeur des shunts, de la tare, etc.) : $0,015 \mu\Omega$

somme quadratique $s = 0,022 \mu\Omega$

2 - Incertitude sur le résultat final des comparaisons :

L'analyse de la dispersion des résultats obtenus par les divers étalons voyageurs d'un même laboratoire est un moyen d'estimer l'incertitude du rattachement de la représentation de l'ohm conservée par ce laboratoire à celle conservée par le BIPM.

Le calcul effectué pour chaque laboratoire conduit à des valeurs très dispersées de la variance (valeurs comprises entre 0 et $145 \times 10^{-4} \mu\Omega^2$) dont la moyenne est $32 \times 10^{-4} \mu\Omega^2$, soit un écart-type de $0,057 \mu\Omega$.

Mais cet écart-type ne tient pas compte des erreurs systématiques qui ont pu affecter les mesures faites dans les laboratoires nationaux et au BIPM. Si l'on admet que les incertitudes systématiques sont du même ordre de grandeur pour les laboratoires nationaux que pour le BIPM, il faut majorer la variance calculée ci-dessus de $2 \times 3,25 \times 10^{-4} \mu\Omega^2$, ce qui conduit à $38,5 \times 10^{-4} \mu\Omega^2$, c'est-à-dire à un écart-type de $6,2 \times 10^{-2} \mu\Omega$ comme incertitude du rattachement obtenu avec un étalon.

Pour les laboratoires qui ont participé aux comparaisons avec deux étalons l'écart-type sur le résultat final donné dans le tableau IV serait alors de $\sqrt{\frac{32}{2} + 6,5 \times 10^{-2}} \mu\Omega$, soit environ $0,047 \mu\Omega$ et pour ceux qui ont participé avec trois étalons $\sqrt{\frac{32}{3} + 6,5 \times 10^{-2}} \mu\Omega$, soit environ $0,041 \mu\Omega$.

Septembre 1985

Rapport sur la 14^e comparaison des étalons nationaux de
résistance électrique

(Complément au rapport BIPM-85/9)

Comparaison de Ω_{CSIRO} à $\Omega_{69\text{-BI}}$

Les deux étalons voyageurs, engagés par le CSIRO dans la 14^e comparaison des étalons nationaux de résistance de 1 Ω , ayant souffert du transport aller et retour entre Sydney et Paris, et conduit à des résultats peu fiables, une nouvelle comparaison de Ω_{CSIRO} à $\Omega_{69\text{-BI}}$ a été effectuée au début de l'année 1985. Les 4 étalons voyageurs du CSIRO sont parvenus au BIPM le 2 mars et en sont repartis le 7 avril.

En appliquant la même méthode qu'en 1983 et 1984, en utilisant la même installation, dans les mêmes conditions, deux observateurs ont comparé deux à deux entre eux les 4 étalons du CSIRO et chacun de ceux-ci aux 6 étalons de référence du BIPM. Les séries "aller" et les séries "retour" ont été faites symétriquement dans le temps par rapport au 24 mars 1985. Les résultats de ces séries de mesures, traités par la méthode des moindres carrés, ont permis d'exprimer la résistance des étalons voyageurs du CSIRO en fonction de $\Omega_{69\text{-BI}}$ (représentation, conservée par le BIPM, de l'unité SI de résistance).

La succession des opérations que nous avons effectuées pour rattacher Ω_{CSIRO} à $\Omega_{69\text{-BI}}$ a donc été la suivante :

I - Résistance, exprimée en fonction de $\Omega_{69\text{-BI}}$, des étalons voyageurs à 20,000 °C (EIP-68), sous la pression de 101 325 Pa, les étalons étant parcourus par un courant de 0,1 A pendant la durée des observations :

au 24 mars 1985
(date centrale de la comparaison)

S-60650 : 1,000 033 18 ₃	$\Omega_{69\text{-BI}}$	s = 0,006 $\mu\Omega$
S-60651 : 1,000 025 72 ₇		s = 0,006
S-60655 : 0,999 998 01 ₀		s = 0,006
S-60657 : 1,000 000 55 ₈		s = 0,006

II - Résistance des étalons voyageurs à 20,000 °C (EIPT-68), exprimée en fonction de $\underline{\Omega}_{\text{CSIRO}}$.

Ces valeurs, communiquées par le CSIRO, sont des valeurs extrapolées au 24 mars 1985 à partir des résistances déterminées avant l'envoi des étalons au BIPM (colonne n° 1) et des résistances déterminées après retour du BIPM (colonne n° 2).

Résistance au 24 mars 1985

	colonne n° 1	colonne n° 2	moyenne	
S-60650	1,000 031 69	1,000 031 69	1,000 031 69	$\underline{\Omega}_{\text{CSIRO}}$
S-60651	1,000 024 27	1,000 024 25	1,000 024 26	
S-60655	0,999 996 51	0,999 996 48	0,999 996 49 ₅	
S-60657	0,999 999 08	0,999 999 09	0,999 999 08 ₅	

III - Relation entre $\underline{\Omega}_{\text{CSIRO}}$ et $\underline{\Omega}_{69\text{-BI}}$

			$[\underline{\Omega}_{\text{CSIRO}} - \underline{\Omega}_{69\text{-BI}}]$
S-60650	: 1,000 031 69 $\underline{\Omega}_{\text{CSIRO}}$	= 1,000 033 18 ₃ $\underline{\Omega}_{69\text{-BI}}$	+ 1,49 ₂ $\mu\Omega_{\text{CSIRO}}$
S-60651	: 1,000 024 26 $\underline{\Omega}_{\text{CSIRO}}$	= 1,000 025 72 ₇ $\underline{\Omega}_{69\text{-BI}}$	+ 1,46 ₆ $\mu\Omega_{\text{CSIRO}}$
S-60655	: 0,999 996 49 ₅ $\underline{\Omega}_{\text{CSIRO}}$	= 0,999 998 01 ₀ $\underline{\Omega}_{69\text{-BI}}$	+ 1,51 ₅ $\mu\Omega_{\text{CSIRO}}$
S-60657	: 0,999 999 08 ₅ $\underline{\Omega}_{\text{CSIRO}}$	= 1,000 000 55 ₈ $\underline{\Omega}_{69\text{-BI}}$	+ 1,47 ₃ $\mu\Omega_{\text{CSIRO}}$

en moyenne, au 24 mars 1985 : $\underline{\Omega}_{\text{CSIRO}} = \underline{\Omega}_{69\text{-BI}} + 1,49 \mu\Omega.*$

Tous les résultats de la 14^e comparaison des étalons nationaux de résistance sont donc maintenant connus. Nous les avons rassemblés dans le tableau ci-après :

* En annexe nous donnons la valeur absolue de $\underline{\Omega}_{69\text{-BI}}$ et celle de sa dérive depuis 1964, recalculées en tenant compte de ce nouveau résultat (calcul précédent dans BIPM Proc.-Verb. Com. Int. Poids et Mesures, 51, 1983, pp. 56).

Résultats complets de la 14^e comparaison
des étalons nationaux de résistance électrique

Au 26 novembre 1983

Afrique du Sud (NPRL)	: $\frac{\Omega}{\Omega_{NPRL}}$	= $\frac{\Omega}{\Omega_{69-BI}}$	- 0,12 $\mu\Omega$
République Dém. Allemande (ASMW)	: $\frac{\Omega}{\Omega_{ASMW}}$	=	+ 0,06
République Féd. d'Allemagne (PTB)	: $\frac{\Omega}{\Omega_{PTB}}$	=	+ 1,06
Canada (NRC)	: $\frac{\Omega}{\Omega_{NRC}}$	=	- 1,86
France (LCIE)	: $\frac{\Omega}{\Omega_{LCIE}}$	=	+ 0,93
Italie (IEN)	: $\frac{\Omega}{\Omega_{IEN}}$	=	+ 1,45
URSS (IMM)	: $\frac{\Omega}{\Omega_{IMM}}$	=	+ 1,45

Au 12 février 1984

République Pop. de Chine (NIM)	: $\frac{\Omega}{\Omega_{NIM}}$	= $\frac{\Omega}{\Omega_{69-BI}}$	+ 0,50 $\mu\Omega$
Etats-Unis d'Amérique (NBS)	: $\frac{\Omega}{\Omega_{NBS}}$	=	+ 0,19
Japon (ETL)	: $\frac{\Omega}{\Omega_{ETL}}$	=	+ 1,56
Pays-Bas (VSL)	: $\frac{\Omega}{\Omega_{VSL}}$	=	+ 0,56
Royaume-Uni (NPL)	: $\frac{\Omega}{\Omega_{NPL}}$	=	+ 0,32

Au 24 mars 1985

Australie (CSIRO)	: $\frac{\Omega}{\Omega_{CSIRO}}$	= $\frac{\Omega}{\Omega_{69-BI}}$	+ 1,49 $\mu\Omega$
-------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	--------------------

avec

$$\text{et } \frac{\Omega}{\Omega_{69-BI}} (\text{au 12 février 1984}) - \frac{\Omega}{\Omega_{69-BI}} (\text{au 26 novembre 1983}) = - 0,012 \mu\Omega$$
$$\text{et } \frac{\Omega}{\Omega_{69-BI}} (\text{au 24 mars 1985}) - \frac{\Omega}{\Omega_{69-BI}} (\text{au 26 novembre 1983}) = - 0,072 \mu\Omega.$$

novembre 1985

Annexe

Estimation de la valeur absolue de $\underline{\Omega}_{69-BI}$ (représentation, conservée par le BIPM, de l'unité SI de résistance) et de son évolution au cours du temps.

Depuis 1964, époque à partir de laquelle la valeur de $\underline{\Omega}_{CSIRO}$ (représentation, conservée par le CSIRO, de l'unité SI de résistance) a été déduite de celle de \underline{F}_{CSIRO} (représentation, conservée par le CSIRO, de l'unité SI de capacité) déterminée en valeur absolue au moyen d'un condensateur à variation de capacité calculable, $\underline{\Omega}_{CSIRO}$ et $\underline{\Omega}_{69-BI}$ ont été comparées six fois entre elles. Les résultats suivants ont été obtenus :

1964-01-26 :	$\underline{\Omega}_{CSIRO} - \underline{\Omega}_{69-BI} = - 0,31 \mu\Omega$	$s = 0,10 \mu\Omega$
1967-02-18 :	$= - 0,45$	$= 0,10$
1970-02-01 :	$= - 0,57$	$= 0,10$
1973-02-25 :	$= - 0,80$	$= 0,10$
1977-05-19 :	$= - 1,02$	$= 0,10$
1985-03-24 :	$= - 1,49$	$= 0,10$

En utilisant la méthode des moindres carrés, on a déduit de ces résultats l'équation ci-dessous de la droite représentative de l'évolution de la différence entre $\underline{\Omega}_{69-BI}$ et $\underline{\Omega}_{CSIRO}$ (voir graphique) :

$$\underline{\Omega}_{69-BI} - \underline{\Omega}_{CSIRO} = a + bt,$$

dans laquelle

t est la durée, évaluée en années, depuis le 1^{er} janvier 1985,
 $a = - 1,461 \mu\Omega$ (écart-type : $0,025 \mu\Omega$)
et $b = - 0,056 6 \mu\Omega/a$ (écart-type : $0,001 8 \mu\Omega/a$) ;
la covariance de a et b est $+ 0,000 039 \mu\Omega^2/a$.

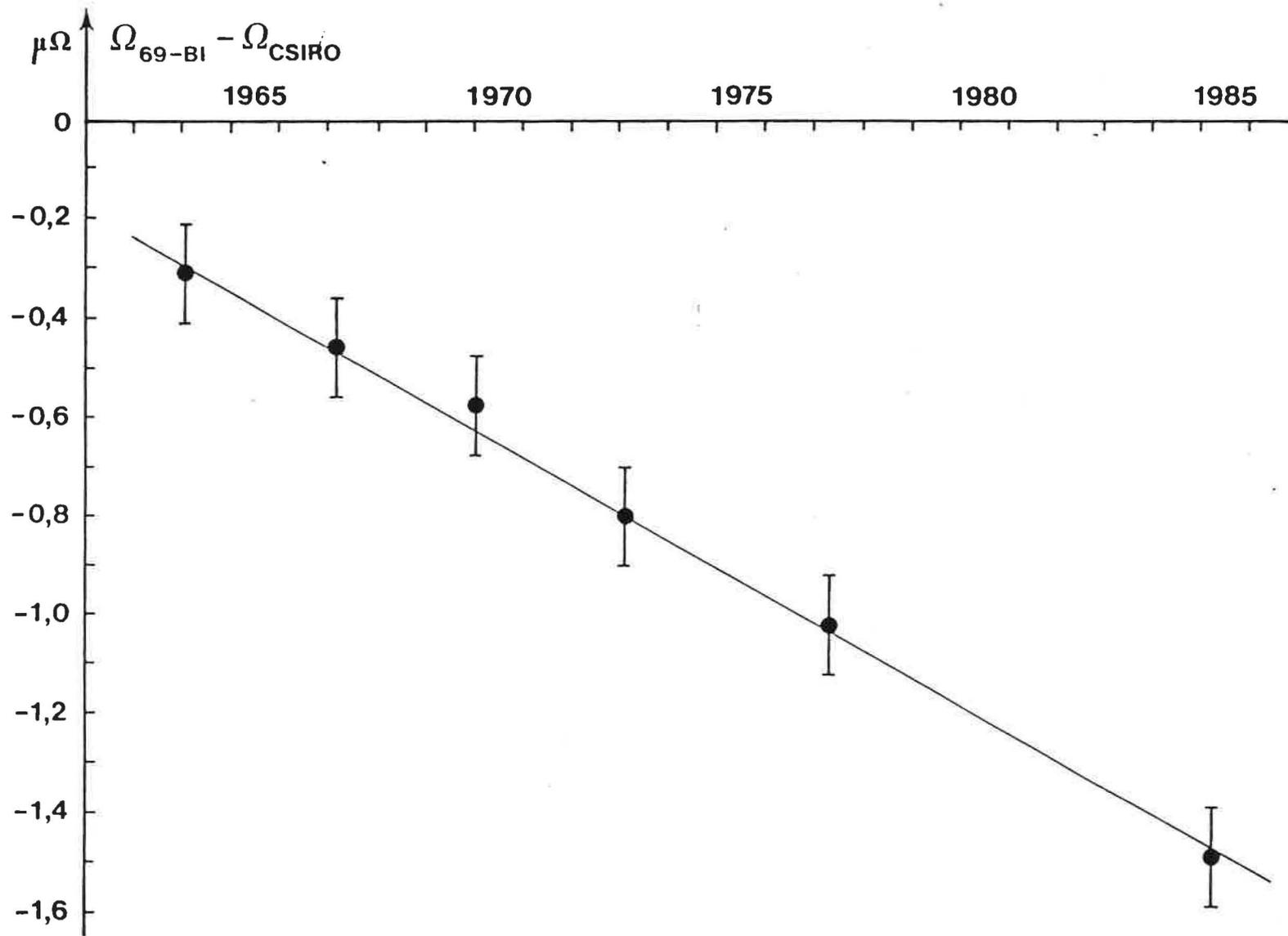
Si l'on admet que depuis 1964, $\underline{\Omega}_{CSIRO} = 1 \Omega \pm 0,2 \mu\Omega$, on en conclut que

$$\underline{\Omega}_{69-BI} = 1 \Omega - (1,46 \pm 0,2) \mu\Omega, \text{ au } 1^{\text{er}} \text{ janvier } 1985$$

et diminue de $(0,056 6 \pm 0,001 8) \mu\Omega$ par an.

Les incertitudes indiquées correspondent à la valeur estimée de l'écart-type.

novembre 1985



Variation de $[\Omega_{69-BI} - \Omega_{CSIRO}]$ en fonction du temps.